

**摘要:** 运用生命周期成本法分析了首钢京唐钢铁公司某敞开式净循环水系统的生命周期成本。对该系统在运行过程中涉及的各项成本进行量化分析,并且随季节变化而改变系统边界条件,从而得出不同的浓缩倍数的优化结果。

**关键词:** 敞开式; 净循环水系统; 浓缩倍数; 生命周期成本



# 敞开式净循环水系统 最优浓缩倍数的探讨 (上)

张建红<sup>1</sup>, 吴礼云<sup>2</sup>, 刘正发<sup>3</sup>, 陈志新<sup>4</sup>, 徐明<sup>5</sup>, 李金辉<sup>3</sup>

(1. 首钢技术研究院, 北京 100043; 2. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司, 河北曹妃甸 063200;

3. 首钢新钢有限责任公司动力厂, 北京 100041; 4. 北京首钢国际工程技术有限公司, 北京 100043;

5. 唐山首钢宝业钢铁有限责任公司, 北京 100041)

尽管我国水资源短缺,但是技术限制和管理落后等原因造成的浪费水现象仍然十分严重。据不完全统计,国内平均吨钢新水耗量是国外先进企业的近4倍,其他工业产品的单位耗水量均比国外高数倍。我国冶金工业水重复利用率平均不到70%,而发达国家高达90%。

水的循环利用是冶金企业用水的基本特征,而浓缩倍数是衡量节水的—个重要技术经济指标。同时,提高循环冷却水的浓缩倍数,也是节水减排的重要手段。但是浓缩倍数并非越高越好,浓缩倍数过高后对水质稳定配方、药剂性能的要求更加苛刻,药剂的费用将大幅度增加。因此必须对循环冷却水系统在不同浓缩倍数条件下的生命周期成本进行分析,从而确定最优浓缩倍数。

## 1 循环冷却水系统生命周期成本分析

生命周期成本法是将企业生命周期内的各种成本,包括环境成本都纳入其涵盖范围之内的一种考虑了企业生产经营全部环境影响的成本计划与控制方法。生命周期成本(LCC)包含:内部成本(IC:企业再生产过程中所用原料、公用工程的成本费用);外部环境成本内部化,即外部成本(EC:产品生命周期过程中所有环境费用的总和)。

由于钢铁工业生产中有70%~80%的冷却水为

间接冷却水,因此选取某个净循环冷却水系统为研究对象,对其生命周期成本进行分析。

### 1.1 内部成本 IC

内部成本是指传统跟生产有关(原料、能源、人力资源、设备等)的费用、潜在费用和不可估算费用。循环冷却水系统的内部成本构成主要包括以下几个方面:补水费 $IC_1$ ,水泵电费 $IC_2$ ,冷却风机电费 $IC_3$ ,排污费 $IC_4$ ,缓蚀阻垢药剂费 $IC_5$ ,杀菌灭藻药剂费 $IC_6$ 以及系统设备折旧、维护费 $IC_7$ (人力资源费等一般为定值,在此不考虑)。

#### 1.1.1 补水费 $IC_1$

$$\text{补水量 } Q_m = \frac{N \alpha}{N-1+\alpha} \times Q \quad (1)$$

式中:  $Q_m$ ——系统补水量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;

$N$ ——循环水浓缩倍数;

$\alpha$ ——蒸发损失量 ( $\alpha = \Delta T / 600$ ,  $\Delta T$  为冷却塔进出口温差。由于冬季气温很低,接触传热量可占总传热量的50%以上,甚至70%左右;夏季气温较高,接触传热量甚小,蒸发传热占主要地位,其传热量可占总传热量的80%~90%。因此在各季节冷却塔进出口温差是有差别的。如夏季取  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ , 春秋季可取  $\Delta T = 6^\circ\text{C}$ , 冬季可取  $\Delta T = 4^\circ\text{C}$ 。);

$Q$ ——系统用水量,  $\text{m}^3/\text{h}$ 。

据此可计算不同浓缩倍数下的补水费用:

$$IC_1 = \frac{Q_m \cdot f_1}{10000} \cdot t_1 \quad (2)$$

式中： $IC_1$ ——系统补水费用，万元/季度；

$f_1$ ——水费单价，元/ $m^3$ 。

### 1.1.2 循环供水泵电费

由于清循环冷却水系统是通过管网压力进行补水的，因此在各浓缩倍数条件下用电量是一样的，即：

$$A_1 = P_1 \cdot t_1 \quad (3)$$

式中： $A_1$ ——供水泵耗电量，kWh/季度；

$P_1$ ——水泵的功率，kW；

$t_1$ ——供水泵运行时间，h。

因此水泵电费为：

$$IC_2 = \frac{Q_m \cdot f_2}{10000} \quad (4)$$

式中： $IC_2$ ——供水泵电费，万元/季度；

$f_2$ ——电费单价，元/kWh。

### 1.1.3 冷却风机电费

在相同的工况下，热负荷一定，冷却塔的冷却数也是相同的，根据冷却塔的性能曲线可知，水气比也是相同的，即风机的风量也是相同的，因此在不同的浓缩倍数下风机的功率也是一样的。然而，由于各季节蒸发传热量不一样，因此风机的运行时间也不一样。风机耗电量为：

$$A_2 = P_2 \cdot t_2 \quad (5)$$

式中： $A_2$ ——风机耗电量，kWh/季度；

$P_2$ ——风机的功率，kW；

$t_2$ ——风机运行时间，h。

因此风机电费为：

$$IC_3 = \frac{A_2 \cdot f_2}{10000} \quad (6)$$

### 1.1.4 排污费

排污量为：

$$Q_h = \frac{\alpha}{N-1+\alpha} \times Q \quad (7)$$

式中： $Q_h$ ——系统排水量， $m^3/h$ 。

据此可以计算出不同浓缩倍数条件下的系统排污费，即：

$$IC_4 = \frac{Q_h \cdot f_3}{10000} \cdot t_1 \quad (8)$$

式中： $IC_4$ ——系统排污费，万元/季度；

$f_3$ ——排污费单价，元/ $m^3$ 。

### 1.1.5 缓蚀阻垢剂药费

伴随系统运行，风吹损失及排污损失均会带走

部分药剂，而进入系统的补充水不含药剂，这将导致循环冷却水中的药剂浓度下降，不能达到预期效果。因此，应不断向循环冷却水中补充药剂，以确保循环冷却水中的药剂浓度相对稳定。另外，如系统中有铜或铜合金换热设备时，循环冷却水处理应投加铜缓蚀剂或采用硫酸亚铁进行铜管成膜。铜缓蚀剂用量较少，一般可与缓蚀阻垢剂混匀一起投加。缓蚀阻垢剂加药量为：

$$G_v = \frac{Q_e \cdot g}{1000(N-1)} = \frac{Q_m \cdot g}{1000N} \quad (9)$$

式中： $G_v$ ——系统正常运行时单位时间内的加药量，t/季度；

$$\text{蒸发水量 } Q_e = \frac{(N-1)\alpha}{N-1+\alpha} \times Q \quad (10)$$

$g$ ——单位体积循环水缓蚀阻垢剂的加药量，mg/L。

则系统缓蚀阻垢剂的费用即为：

$$IC_5 = \frac{G_v \cdot f_4}{10000} \cdot t_1 \quad (11)$$

式中： $IC_5$ ——系统药剂费用，万元/季度；

$f_4$ ——缓蚀阻垢剂单价，元/t。

### 1.1.6 杀菌灭藻剂药费

循环冷却水系统的水温和pH值均适宜微生物生长，冷却塔塔下水池又常年露置室外，阳光充足，这更给微生物的生长繁殖创造了条件。微生物主要是菌藻类，它们的存在不仅使水质恶化，还与其它有机或无机杂质构成粘垢附着、沉积在系统内，增加了水流阻力，并且严重地降低了热交换设备的传热效率，粘垢不仅妨碍缓蚀剂发挥其防腐蚀功能，甚至促进腐蚀过程。因此，必须采取适当措施控制菌藻类在循环冷却水中的生长繁殖。目前冶金企业最常用的杀生剂是氧化型杀菌剂。杀菌灭藻剂的加药量为：

$$G_c = \frac{G_r \cdot g_c}{1000} \quad (12)$$

式中： $G_c$ ——系统正常运行时单位时间内的加药量，t/季度；

$g_c$ ——单位体积循环水杀菌灭藻剂的加药量，mg/L。

则系统杀菌灭藻剂的费用即为：

$$IC_6 = \frac{G_c \cdot f_5}{10000} \cdot t_1 \quad (13)$$

式中： $IC_6$ ——系统药剂费用，万元/季度；

$f_5$ ——缓蚀阻垢剂单价，元/t；

$t_3$ ——杀菌灭藻剂投加时间, h。考虑夏季高温季节时菌藻繁殖旺盛, 危害明显, 因此采用夏季连续投加方式,  $gc$  取值  $0.5 \sim 0.8 \text{ mg/L}$ ; 其余季节采用间歇投加方式, 春秋季  $gc$  取值  $2 \sim 4 \text{ mg/L}$ , 一天投加两次, 每次 3h; 冬季  $gc$  取值  $2 \sim 4 \text{ mg/L}$ , 一天投加两次, 每次 2h。

### 1.1.7 系统设备折旧、维护费

在高浓缩倍数下, 由于冷却水中的含盐量逐步增高, 金属设备表面形成的腐蚀电池的腐蚀电流增大, 腐蚀速率就会加快, 从而导致系统设备加速折旧。因此, 必须保证系统在合理的浓缩倍数下运行。根据在不同浓缩倍数下设备腐蚀情况的试验数据, 设备折旧率模型近似可用指数函数形式表示, 即:

$$\eta = \alpha \cdot e^{bN} \quad (14)$$

式中:  $\eta$ ——设备折旧率, %;

$\alpha, b$ ——系统设备折旧系数, 可转化为最小二乘拟合曲线求解。

折旧费即为系统设备的一次投资与折旧率的乘积, 即:

$$IC_7 = C \cdot \eta \quad (15)$$

式中:  $IC_7$ ——系统设备折旧费, 万元/季度;

$C$ ——设备一次投资费用, 万元。

该循环冷却水系统的内部成本即为:

$$IC = \sum IC_i \\ = IC_1 + IC_2 + IC_3 + IC_4 + IC_5 + IC_6 + IC_7 \quad (16)$$

## 1.2 外部成本

外部成本指有关企业公益活动和社会责任的费用(如废物排放导致的环境影响费、污染控制费、处置费、生态修复费和回收回用费等)。循环冷却水系统的外部成本主要包括水资源附加费, 发电排放附加费, 废水排污附加费, 缓蚀阻垢剂使用排放附加费, 杀菌灭藻剂使用排放附加费, 设备折旧再造附加费。

### 1.2.1 水资源附加费

模型中补水主要考虑为工业水, 若要转化为对水资源的消耗就必须找出工业水的产出系数, 那么水资源附加费即为:

$$EC_1 = \frac{Q_m \cdot \mu \cdot f_6}{10000} \cdot t_1 \quad (17)$$

式中:  $EC_1$ ——水资源附加费, 万元/季度;

$\mu$ ——工业水产出系数; 一般自用水率为 5%~10%, 可取  $\mu$  为 1.06;

$f_6$ ——水资源附加费, 元/ $\text{m}^3$ 。

### 1.2.2 发电排放附加费

在发电过程中会排放  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  以及粉尘等环境有害物质, 根据估算的各污染物的环境价值所得出的发电过程中各污染物的排放量就可以计算其环境成本, 即:

$$EC_2 = \frac{A \cdot \sum_{i=1}^n \theta_i V_i}{10000} \quad (18)$$

$$A = \sum A_i = A_1 + A_2 \quad (19)$$

式中:  $EC_2$ ——发电排放附加费, 万元/季度;

$A$ ——系统耗电量,  $\text{kWh}$ /季度;

$\theta_i$ ——第  $i$  项污染物的环境价值单位, 元/ $t$ ;

$V_i$ ——第  $i$  项污染物的排放量,  $t/\text{kWh}$ 。

几种主要污染物的环境价值见表 1。

表 1 几种主要污染物的环境价值

污染物	$\text{CO}_2$	$\text{SO}_2$	$\text{NO}_x$	CO	废水
环境价值(元/ $t$ )	23	6000	8000	1000	0.8

### 1.2.3 废水排污附加费

废水排放必将对环境造成不同程度的危害, 因此有必要对废水的环境价值进行估算。废水排放附加费为废水的排放量与废水环境价值的乘积, 即:

$$EC_3 = \frac{Q_w \cdot f_7}{10000} \cdot t_1 \quad (20)$$

式中:  $EC_3$ ——废水排放附加费, 万元/季度;

$f_7$ ——废水环境价值, 元/ $t$ 。

### 1.2.4 缓蚀阻垢剂使用排放附加费

由于药剂在生产、制造及使用过程中会造成环境的损害, 因此须计算出在不同浓缩倍数下系统所添加的药剂量, 再根据其造成的环境污染物的环境价值来估算药剂消耗所造成的环境价值, 即:

$$EC_4 = \frac{G_r \cdot \sum_{i=1}^n \theta_i V_i}{10000} \cdot t_1 \quad (21)$$

式中:  $EC_4$ ——缓蚀阻垢剂消耗附加费, 万元/季度;

$V_i$ ——第  $i$  项污染物的排放量,  $t/t$ 。

### 1.2.5 杀菌灭藻剂使用排放附加费

$$EC_5 = \frac{G_e \cdot \sum_{i=1}^n \theta_i V_i}{10000} \cdot t_3 \quad (22)$$

式中:  $EC_5$ ——杀菌灭藻剂消耗附加费, 万元/季度;

$V_i$ ——第  $i$  项污染物的排放量,  $t/t$ 。

(未完待续)